



TITLE:

スピン液体状態における熱輸送現象(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

渡邊, 大樹

CITATION:

渡邊, 大樹. スピン液体状態における熱輸送現象. 京都大学, 2016, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2016-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k19485>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2020-07-14に公開; 許諾条件により要約は2017-01-01に公開

(続紙 1)

京都大学	博 士（理 学）	氏名	渡邊大樹
論文題目	スピン液体状態における熱輸送現象		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>物を低温に冷やしていくと温度によって決まる熱揺らぎが物質間の相互作用の力より小さくなるため、その系は相互作用によって決まる秩序状態を形成する。絶対零度では熱揺らぎは存在しないため、あらゆる物質はなんらかの秩序状態を示すことが単純には期待される。しかし、ハイゼンベルグの不確定性原理に基づく量子揺らぎは絶対零度でも存在し、この量子揺らぎによって秩序状態の形成が阻害されるとき、系は非自明な量子凝縮状態を示す。こうした量子状態は「量子液体」と呼ばれ、その基底状態のもつ特異な性質が盛んに研究されてきた。量子液体のもっとも有名な例は絶対零度まで固化しない液体ヘリウムの示す超流動であり、そこでは量子液体状態が文字通り実現しているといえる。</p> <p>近年、磁性体中の電子スピンの量子液体「量子スピン液体」が大きな注目を集めている。通常、磁性体中のスピン間には平行か反平行に向こうとする力が働くため、スピンは低温で強磁性や反強磁性の磁気秩序状態を形成する。しかし、量子揺らぎの効果が強く働くような状況では、電子スピンの磁気秩序状態が量子揺らぎによって破壊され、新しい量子凝縮状態が現れることが期待されている。この量子スピン液体と呼ばれるスピンの量子液体状態は、1次元スピン系ではよく理解されているのに対して、2次元スピン系においては様々な新しい状態とそこでの新奇素励起が理論的に長年研究されているにもかかわらず、その詳細は理論的にも実験的にも未だ明らかでない。</p> <p>この2次元量子スピン液体状態を明らかにするためには、量子スピン液体の素励起の性質を明らかにすることが必須である。最近、スピン液体の素励起の特徴の一つとして、スピン励起が磁場中でホール効果を示す性質があることが理論的に指摘され、その実験的検証に注目が集まっている。ホール効果は通常、金属中の電子が磁場によってローレンツ力を受けることで示す性質であり、電荷をもたないスピン励起にはホール効果は存在しない。しかし、スピン素励起の性質と系の持つトポロジ効果によってある種の磁性体中では電荷をもたないスピン励起がホール効果を示すことが理論的に指摘されている。スピン励起は電荷を運ばないが、熱を運ぶことが知られているため、このホール効果は熱ホール効果として観測されることが期待される。</p> <p>我々はこの熱ホール効果の有無とその物性を明らかにするため、カゴメ格子物質のボルボサイトを用いて熱伝導率・熱ホール測定をおこなった。ボルボサイトはスピン1/2をもつ銅原子が二次元面内でカゴメ格子上に並んだ構造をもつ物質である。このカゴメ格子の持つ幾何学的フラストレーションの効果によって、スピン間の有効的な相互作用 ($J_{\text{eff}}/k_B \sim 60 \text{ K}$) に比べて十分低温まで磁気秩序 ($T_N \sim 1 \text{ K}$) が抑えられた磁気構造を有している。ボルボサイトの純良単結晶における比熱 (C) と磁化率 (χ) の測定から、磁気秩序が抑制された温度領域 ($T_N < T < J_{\text{eff}}/k_B$) において、$C/T$ と χ の絶対零度外挿に有限の値が残ることが分かった。これはこの温度領域でギャップレスのスピン励起を持つスピン液体状態が形成されていることを示している。</p> <p>このギャップレス励起の詳細を調べるために我々はボルボサイトの熱伝導率・熱ホール伝導率測定をおこなった。熱伝導率の磁場依存性から、約20 K以下の温度では磁場によって熱伝導率の減少が観測されることが分かった。磁性絶縁体における熱伝導率は格子による熱伝導率 (κ_{phonon}) とスピンによる熱伝導率 (κ_{spin}) の和で表すこと</p>			

ができる。このうち、 κ_{phonon} は磁場中で増加することが知られているため、磁場による減少分は κ_{spin} によるものであることがわかる。このことから、ボルボサイトでスピン励起が熱を運んでいることと、そのスピン励起の平均自由行程が8 Kで銅イオンの格子間隔の80倍程度になっていることが分かった。

熱流に対して垂直方向に現れる温度差(ΔT_y)から求まる熱ホール測定にあたっては、非常に小さな熱ホール信号を測定する必要があるため、様々な改良を行った。特に、試料の周りに熱浴などに金属を用いるとそこでの通常ホール効果の影響を受けてしまうために、熱伝導性の良い絶縁体や真空グリースによって試料を熱的に固定した。これらの改良によって非常に小さなホール信号(ホール角にして $\theta_H \sim 10^{-4}$)も測定できるようになった。この結果、我々は非常に小さいが有限の熱ホール効果を測定することに成功した。この測定結果が温度計の磁場中校正のエラーなどによるものでないことを確認するために、我々は様々なテストを行った。まず、試料を取り外した状態でバックグラウンドの熱ホール信号をチェックし、それが試料から来る信号より十分小さいことを確認した。さらに、試料の温度を一定に保った状態で、観測される ΔT_y と試料に流す熱流の関係を調べたところ、 ΔT_y が熱流に比例することが確認された。これらの結果は、観測された信号が試料由来の信号であることの証拠となっている。

このようにして観測に成功した熱ホール伝導率(κ_{xy})の温度依存性を調べたところ、 κ_{xy} は有効的スピン間相互作用で決まる温度($J_{\text{eff}}/k_B \sim 60$ K)から現れ始め、磁化率が極大を示す温度において κ_{xy} も極大を示すことが分かった。さらに、磁気転移温度近傍で κ_{xy} は符号変化を示すことが分かった。これらの測定結果は κ_{xy} はスピン励起による効果であり、スピン間の相関の発達と磁気秩序の形成に伴って κ_{xy} が変化することを示唆している。さらに、通常の金属中の電子が示すホール効果と比較したところ、スピン励起は外部磁場の100分の1程度の有効磁場を感じてホール効果を示していることが明らかになった。これらの結果はスピン液体状態の性質を明らかにするうえで非常に重要な結果であると考えられえ。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、スピンが強く相互作用しつつも量子力学的、熱力学的な揺らぎによって凍結せずに、液体状になったスピン液体状態における新奇な素励起が存在することを示したものである。具体的には、金属中で電荷を持つ電子がローレンツ力によってホール効果を示すのと類似して、絶縁体中のスピン液体が熱ホール効果を生じることを初めて示したものである。

本博士論文は次のような構成となっている。まず、1章でスピン液体の基本的物性を紹介する。2章では熱輸送測定が超伝導体やスピン液体の素励起を調べるうえで強力な測定手段となっていることを説明する。3章では対象物質であるボルボサイトの基本的物性を紹介し、4章で我々が行った熱伝導率・熱ホール伝導率測定の詳細について述べる。5章で主な実験結果を紹介してその結果について議論したのち、6章でまとめを述べる。

スピン液体の性質は現代物理学の中で大きな謎となっており、特にどのような素励起があるかは、これまで大きな謎であった。本論文の結果は、スピン液体における何らかの対称性を破るトポロジカルな励起が存在することを、はじめて明らかにしたものであり、その学術的価値は高く、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成28年1月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降

要旨公表可能日： 年 月 日以降

〔注〕

1. (記述例1)を参考に、論文審査の結果の要旨の結句には学位論文の審査についての認定を明記するとともに、試問の結果の要旨を付け加えてください。
2. 論文の公表方法について、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断され、かつその旨を「論文審査の結果の要旨」に記載する場合は(記述例2)を参考に記述してください。**【別途「公表方法について」が提出されるため特に記載の必要はない】**
3. 論文内容の要旨及び審査の結果の要旨は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表します。特許申請、雑誌掲載等の関係により、学位授与後即日公表することに支障がある場合は、欄外の「要旨公表可能日」欄に、公表可能とする日付を記入してください。(ただし、学位規則第8条の規定により、猶予期間は学位授与日から3ヶ月以内となります。)